پیش‌بینی و چگونگی در اختیارگرفتن نشست خاکریز ساخته شده روی پی سست با مسلح سازی به کمک ژئوتکستایل (مطالعه موردی بزرگراه شهید کلانتری در کیلومتر ۸۰۰+۷)*

کاظم بدو[۱] رقیه امامی[۲]

چکیده *ساختن خاکریز روی خاک‌های آلی و سست به دلیل فشردگی پذیری زیاد و مقاومت برشی کم با دشواری‌هایی مانند نشست زیاد، تغییر شکل‌های بلند مدت و ناپایداری خاکریز روبرو است. امروزه کاربرد مواد پلیمری ژئوسینتتیک به عنوان یکی از روش‌های کاربردی اصلاح خاک پذیرفته شده و مورد استفاده گسترده‌ای قرار می‌گیرد. در این مقاله با کمک نرم افزار PLAXIS و الگوی رفتاری خاک نرم خزشی، رفتار خاکریز روی بستری از خاک‌های آلی و سست در بخشی از بزرگراه شهید کلانتری تحلیل شد. نشست‌هایی که در طول ۹ سال پس از ساختن بزرگراه روی دادند، به خوبی با نتیجه‌های تحلیل عددی هماهنگی داشت. در پی یافتن چاره‌ای برای کاهش نشست، اثرگذاری وجود یک لایه ژئوتکستایل در بستر مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های تحلیل‌های نشست نشان داد که کاربرد لایه ژئوتکستایل به عنوان مسلح‌کننده، سبب بهبود کارکرد خاکریز در این بخش از جاده می‌شود.*

واژه‌های کلیدی خاکریز، نشست، پی سست، مسلح‌کننده ژئوتکستایل، الگوی خاک نرم خزشی، PLAXIS

Prediction and Control of Settlement of the Highway Constructed on Soft Soil using Reinforcement by Geotextile (Case Study of Shahid-Kalantari Highway at 7+800 km)

K. Badv R. Emami

Abstract *Construction the embankment on the soft soils leads to problems such as long term deformations and embankment stability due to high compressibility and low shear strength of the soil. Nowadays the use of geosynthetics is a practical procedure for improving soft soils characteristics. In this paper, a numerical modeling of the embankment constructed on the soft organic soil in the part of the Shahid Kalantari Highway was performed using the PLAXIS Code and Soft Soil Creep Model. The settlement of the highway after 9 years was reasonably predicted by numerical analysis. The effect of geotextile layer at the base of the embankment was then evaluated as a remedial action to control settlement. The results showed that the application of the geotextile layer, as a reinforcement layer, could significantly improve the performance of the embankment in this part of the highway.*

Key Words Embankment, Settlement, Soft Soil, Geotextile Reinforcement, Soft Soil Creep Model, PLAXIS

---

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۸/۲/۱۲ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۹۰/٤/٦ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسؤول، دانشیار گروه مهندسی عمران ، دانشگاه ارومیه

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی، گروه عمران، دانشگاه ارومیه

مقدمه

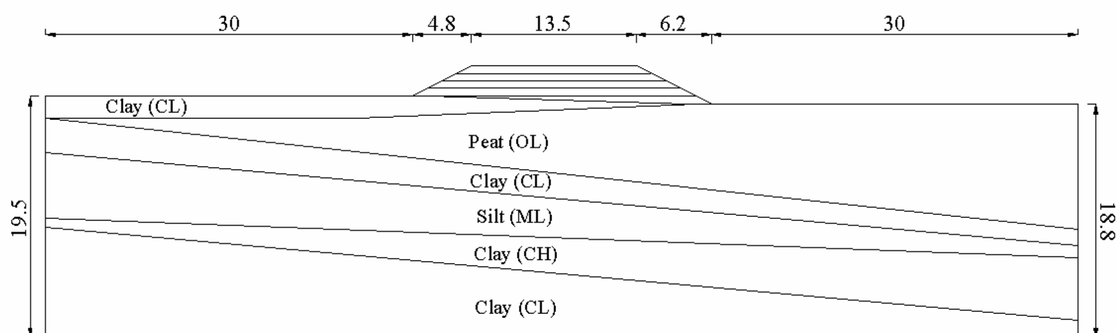
طراحی و ساخت خاکریز روی بسترهای سست یکی از مسأله‌های چالش برانگیز در مهندسی ژئوتکنیک به شمار می‌رود. از ویژگی‌های اصلی خاک‌های سست، فشردگی پذیری زیاد و مقاومت برشی کم آنها می باشد که سبب پدیدآمدن تغییر شکل‌های بلند مدت و دشواری‌هایی در پایداری خاکریز می‌شود [1]. از ناپایداری‌های رخ داده در کشورمان می‌توان به نشست بزرگراه شهید کلانتری در کیلومتر ۷+۸۰۰ اشاره کرد. خاکریز بزرگراه شهید کلانتری ارومیه را به عنوان بخشی از پروژه میان‌گذر دریاچه ارومیه در تاریخ ۱۳۷۲ اداره کل راه و ترابری استان آذربایجان غربی ساخته است. این جاده تا تاریخ ۱۳۸۱ در کیلومتر ۷+۸۰۰ در طول تقریبی ۱۰۰ متر نشست چشم‌گیری داشت. بیشترین میزان نشست حدود ۱/۱ متر در میان محور صد متری و شانه راست بزرگراه بوده که منجر به کاربرد بیش از ۵۰۰ تن آسفالت برای بازسازی بزرگراه شده است. نشست بزرگراه از ابتدای ساخت تا زمان نگارش این مقاله را اداره کل راه و ترابری ارومیه با نقشه‌برداری از حاشیه راست، چپ، و وسط بزرگراه در طول سطح محور نشست‌کرده بزرگراه و در فاصله‌های زمانی سه ماهه اندازه‌گیری و گزارش کرده کاوش‌های ژئوتکنیکی وجود لایه‌های ضخیم خاک آلی در زیر و بیشتر در حاشیه راست بزرگراه از یک سو و وجود لایه‌های رس سیلتی سست از سوی دیگر را از عامل‌های اصلی نشست در این قسمت از مسیر نشان داد. روش‌های گوناگونی برای ساخت خاکریز روی بستر سست وجود دارد که هر یک از این روش‌ها کاستی‌ها و برتری‌هایی دارند. یکی از این روش‌ها کاربرد ژئوسینتتیک‌ها می‌باشد که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. در این پژوهش خاکریز بزرگراه شهید کلانتری در دو حالت مسلح و غیر مسلح الگوسازی و رفتار آن مقایسه شده است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که نیروی کششی در مسلح‌کننده که پس از خمیری شدن پی سامان می‌یابد، پایداری را افزایش می‌دهد و از تغییرشکل‌های جانبی خاک پی می‌کاهد. از برتری‌های کاربرد ژئوسینتتیک‌ها بهبود رفتار خاکریز، صرفه‌جویی در هزینه و افزایش امکان ساخت خاکریز می‌باشد [5-2]. مشاهده شده است که با کمک مسلح‌کننده و ساخت گام به گام، امکان ساخت خاکریز تا ارتفاع ۲/۹ متر روی خاک آلی بسیار نرم وجود دارد [6]. Shimel و Gertje [7] گزارش کرده‌اند که با به کار بردن مسلح‌کننده با مقاومت بالا و ساخت گام به گام ساخت خاکریز با ارتفاع ۴/۳ متر روی پی سست ممکن است.

اجزای محدود از هنگامی که برای نخستین بار توسط Clough و Woodward [8] مورد استفاده قرار گرفت به عنوان روشی توانمند برای ارزیابی رفتار شیروانی‌ها و خاکریزها شناخته شد. نرم افزار مورد استفاده برای تحلیل نشست جاده شهید کلانتری نرم افزار PLAXIS 8.2 [9] می‌باشد که آن را شماری از پژوهشگران مانند Hunter و Fell [10] و Hedy و همکاران [11] برای تحلیل نشست خاکریز راه، به کار برده‌اند.

الگوسازی بدون کاربرد مسلح‌کننده

شکل (۱) مقطع عرضی خاکریز و لایه‌های پی جاده شهید کلانتری در کیلومتر ۷+۸۰۰ را نشان می‌دهد. عرض این خاکریز ۱۳/۵ متر، ارتفاع آن در محور میانی خاکریز ۲/۷ متر و شیب‌های دوطرف آن V(۱) : H(۲) می‌باشد. لایه‌های پی زیر خاکریز تا عمق ۲۰ متری شامل لایه‌هایی از خاک سست مانند پیت، سیلت و رس می‌باشد. عرض پی در الگوی عددی به گونه‌ای است که فاصله مرزهای کناری الگو تا کناره خاکریز در حدود ۳۰ متر باشد. سطح آب زیرزمینی ۱ متر زیر تراز زمین طبیعی، در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی چگونگی ساخت خاکریز،

بدنهٔ خاکریز به لایه‌هایی به ضخامت ۰/٦ متر تقسیم شد. این گزینه با محاسبه بر اساس سعی و خطا انجام پذیرفت، به گونه‌ای که با تقسیم شدن ارتفاع بدنه خاکریز به حدود پنج لایه، محاسبات با دقت و در مدت زمان بهینه انجام شود. برای مصالح خاکریز از الگوی موهر- کولمب (کشسان- مومسان) بهره گرفته است. ولی نظر به اینکه مصالح بستر از جنس خاک سست با مقاومت برشی و نفوذپذیری کم می‌باشد، لازم است الگویی در نظر گرفته شود که نتواند رفتار تحکیمی و وابسته به زمان مصالح را شبیه‌سازی کند. این مصالح افزون بر نشست تحکیمی دارای خزش (Creep) نیز می‌باشند. به همین دلیل الگوی پیشرفته خاک نرم خزشی (Soft Soil Creep) جهت الگوسازی این مصالح به کار رفت [1,12,13]. با توجه به ویژگی‌های مصالح خاکریز و نفوذپذیری زیاد آن، رفتار این مصالح، زهکشی شده در نظر گرفته شد. در مورد مصالح لایه‌های پی، با توجه به ریزدانه بودن و نفوذپذیری کم آن و همچنین با توجه به تحکیم‌پذیری مصالح ریزدانه، رفتار زهکشی‌نشده می‌باشد. ویژگی‌های کامل مصالح خاکریز و لایه‌های پی در جداول (۱) و (۲) آمده است. این ویژگی‌ها از گزارش ژئوتکنیک آزمایشگاه فنی و مکانیک ارومیه که مسؤولیت انجام آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی در محل پروژه را عهده‌دار بود درآورده شدند. برای خاکریزهای با ارتفاع کوتاه (کمتر از ۳ متر) که روی پی سست ساخته می‌شوند، نشست‌های دائمی ناشی از بار رفت و آمد یکی از عامل‌های مهم برای دراختیارگرفتن عمر طراحی جاده می‌باشد. عامل‌های بسیاری روی تغییر شکل‌های ناشی از بار رفت و آمد اثر می‌گذارند. این عامل‌ها شامل مقاومت و تغییر شکل خاک پی، ویژگی‌های روسازی، اساس و زیر اساس جاده و میزان و شمار وارد شدن بار رفت و آمد می‌شوند. روش‌های موجود برای محاسبه نشست ناشی از بار رفت و آمد شامل روش‌های عددی، روش بار ایستای معادل و معادلات تجربی هستند. در روش طراحی که Kutara و همکاران [14] پیشنهاد دادند، بار رفت و آمد به صورت بار ایستای معادل در نظر گرفته شده و نظریه تحکیم یک‌بعدی برای برآورد نشست به کار رفته است [14,15]. بر اساس استاندارد روسازی جاده‌های ایران میزان بار رفت و آمد برای هر محور ۸/۲ تن می‌باشد. با توجه به اینکه جاده موردنظر دارای دو نوار می‌باشد، دو بار ۸/۲ تنی به کل جاده وارد می‌شود. با تبدیل این بار به بار گسترده یکنواخت باری برابر ۱۲ kN/m^2 در عرض جاده وجود خواهد داشت. این بار به صورت ایستا به الگو وارد شده است [١٦].



شکل ۱ نمایی از هندسه الگوی خاکریز و لایه‌های پی (ابعاد به متر می‌باشند)

جدول ۱ ویژگی‌ها مصالح لایه‌های پی

عامل‌ها	علامت اختصاری	رس (CL)	پیت (OL)	رس (CL)	سیلت (ML)	رس (CH)	رس (CL)	واحد
وزن مخصوص خاک بالای سطح آب	γ	۱۵/۵	۱٤/۸	۱۵/۵	۱۳/٤	۱۲/٦	۱۱/۱	kN/m^3
وزن مخصوص خاک زیر سطح آب	γsat	۱۷	۱۸	۱٦	۱۸/٦	۱۷/۷	۱۵	kN/m^3
نفوذپذیری افقی	kx	۳x۱۰-۵	۳/۵x۱۰-٤	۱x۱۰-٤	۳/۸x۱۰-٤	٦/٦۵x۱۰-٤	۳/۰۹x۱۰-٤	m/day
نفوذپذیری قائم	ky	۳x۱۰-۵	۳/۵x۱۰-٤	۱x۱۰-٤	۳/۸x۱۰-٤	٦/٦۵x۱۰-٤	۳/۰۹x۱۰-٤	m/day
شاخص فشردگی اصلاح شده	λ*	۰/۰٦	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۰۷۵	۰/۰٦٤	۰/۰۹۸	-
شاخص ورم‌کردگی اصلاح شده	κ*	۰/۰۱۵	۰/۰۳۷	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱۵	۰/۰۱۹	-
شاخص فشردگی دوباره	μ*	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۳۳	-
چسبندگی	c	۱۰	۵	۱۰	۳	۱۲	۱٤	kN/m^2
زاویه اصطکاک داخلی	φ	۲۲	۳۰	۲۰	۲۲	۱٤	۲٤	degree
زاویه گشادشدگی	ψ	۰	۰	۰	۰	۰	۰	degree
نسبت بیش تحکیمی	OCR	۱	۱/۲۷	۱	۱	۱	۱/۵٤	–

شبکه‌بندی. در این الگو اجزای مثلثی ۱۵ گرهی به کار رفتند. شکل (۲) چگونگی شبکه‌بندی الگو را نشان می‌دهد. این شبکه‌بندی نامنظم به نظر می‌رسد، ولی در معمول کارکرد عددی این گونه شبکه بندی، از کارکرد شبکه‌بندی منظم بهتر می‌باشد [17]. در این حالت از اجزای کوچکتر در سازه و مرزهای نزدیک به آن که تمرکز تنش بیشتر است و تغییرات تنش در فواصل مکانی کوتاهی رخ می‌دهد، استفاده شده و در مرزهای دورتر از سازه که تغییرات تنش کمتر است، از اجزای بزرگتر به کار می‌روند. این گونه آرایش شبکه‌بندی، دقت محاسبه را بالا برده و زمان و هزینه محاسبه کاهش می‌دهد.

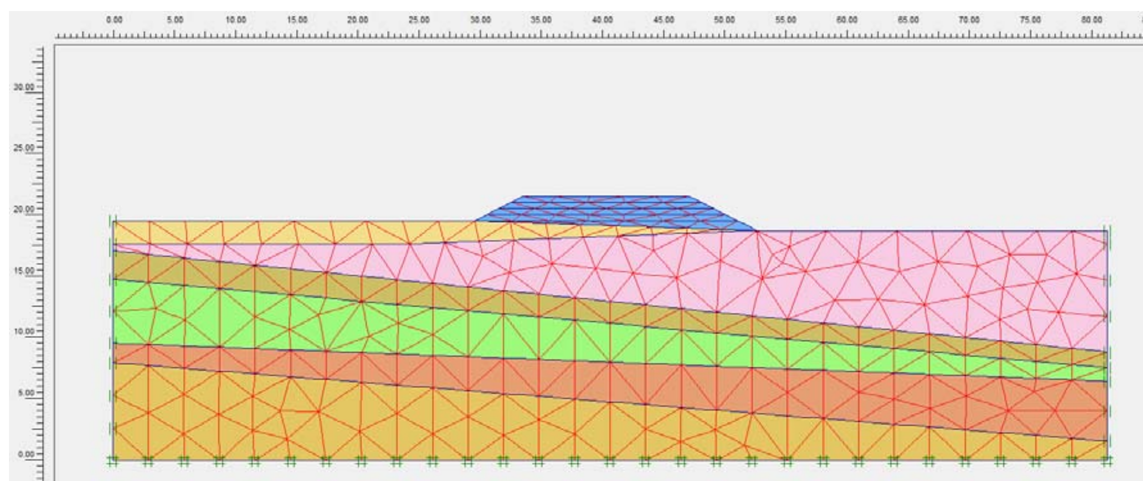
تحلیل الگو. نخست، الگوی خاکریز، به صورت ساخت لایه‌هایی از خاکریز به ضخامت ۰/٦ متر گام به گام تحلیل شده است و فرض شده که مدت زمان ساخت هر لایه دو روز به طول می‌انجامد. برای تعیین ضخامت لایه‌ها سرعت خاکریزی و تناسب زمان خاکریزی با ضخامت هر لایه اهمیت دارد. شکل (۳) جای نقطه‌های هادی انتخاب شده برای رسم نمودارها را نشان می‌دهد. پس از ساخت کل خاکریز، بار رفت و آمد برابر $12kN/m^2$ به خاکریز وارد شده است. سپس تحلیل تحکیم با زمان چهار سال به انجام رسیده است. پس از چهار سال برای بازسازی جاده به کمک آسفالت کردن این بخش بار آسفالت نیز به الگو وارد شده که برابر با وزن آسفالت به ضخامت ۰/۷ متر در شانه راست جاده و ضخامت ۰/۵ متر در شانه چپ جاده می‌باشد. مقدارهای

عددی این‌بار با واردکردن وزن مخصوص آسفالت بنابه آیین‌نامه بارهای وارده بر ساختمان ($۲۲kN/m^2$) به ترتیب برابر $۱۵/٤ kN/m^2$ و $۱۱ kN/m^2$ است. مدت زمان وارد شدن بار آسفالت به الگو یک روز در نظر گرفته شد. پس از وارد شدن بار آسفالت جدید تحلیل تحکیم در پنج سال و سپس هجده ماه به انجام رسید. در گام بعد برای بررسی رفتار خاکریز در سال‌های آینده تحلیل تحکیم تا از بین رفتن کامل فشار آب حفره‌ای و با استفاده از گزینه «کمترین فشار آب حفره‌ای» (Minimum pore (pressure انجام پذیرفته است.

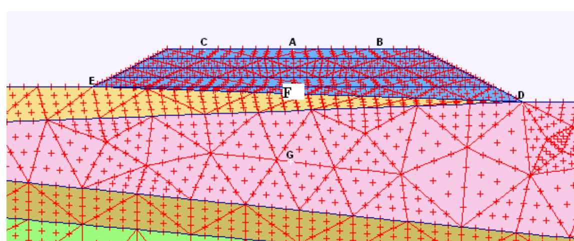
جدول (۳) گام‌های تحلیل الگو را نشان می‌دهد. یادآور می‌شود در این پژوهش از تحلیل جزء به‌هنگام شده بهره گرفته شده است. در تحلیل معمولی جزء محدود از اثر تغییر هندسه جزء روی شرایط تعادل چشم‌پوشی می‌شود. هنگامی‌که برنامه جزء محدود تغییر شکل‌های بزرگ را دربرمی‌گرد، بایستی توانایی‌های ویژه‌ای داشته باشد، زیرا ممکن است هندسه الگو در اثر تغییرشکل‌های بزرگ تغییر یافته و در نتیجه‌های تحلیل اثر بگذارد. برای نمونه، ممکن است بخشی از الگو که بالای سطح آب قرار دارد در اثر نشست زیاد به زیر سطح آب تغییر مکان یافته و وزن مخصوص آن تغییر یابد. در این شرایط نخست باید ماتریس سختی سازه جمله‌های اضافی را برای الگو کردن اثرهای تغییرشکل‌های بزرگ در معادلات جزء محدود دربرگیرد. دوم، باید با روشی درست، تغییرات تنشی که هنگام چرخش مصالح روی می‌دهد را الگوسازی کند. در این شکل ویژه نظریه تغییر مکان‌های بزرگ را بیشتر با پذیرفتن تعریف نرخ تنش که شامل جمله‌های نرخ دوران است، مطرح می‌کنند. سوم، بایستی شبکه‌بندی جزء محدود را به‌هنگام سازد [9]. در این الگو با توجه به روی دادن تغییرشکل‌های بزرگ، برای در نظر گرفتن تغییر هندسه الگو ناشی از این تغییر شکل‌ها تحلیل با کمک جزء به هنگام شده انجام شده است.

جدول ۲ ویژگی‌های مصالح خاکریز

عامل‌ها	نماد کوتاه	خاکریز	واحد
وزن مخصوص خاک بالای سطح آب	γ	۲۰/۵	kN/m^3
وزن مخصوص خاک زیر سطح آب	γ_{sat}	۲۱/۵	kN/m^3
نفوذپذیری افقی	k_x	۱/۰	m/day
نفوذپذیری قائم	k_y	۱/۰	m/day
ضریب کشسانی مرجع	E_{ref}	۵ x۱۰٤	kN/m^2
ضریب کشسانی	$\underline{E}$	۳/۱ x۱۰٤	kN/m^2
نسبت پواسون	υ	۰/۳۵	-
چسبندگی	c	۱	kN/m^2
زاویه اصطکاک	φ	۳٤	degree
زاویه گشادشدگی	ψ	۰	degree



شکل ۲ چگونگی شبکه‌بندی الگو



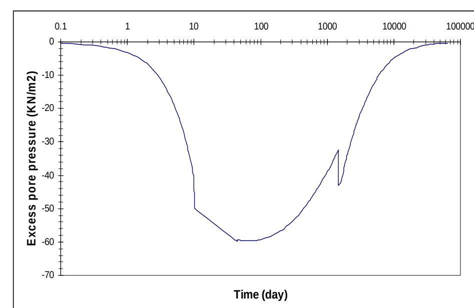
شکل ۳ جای نقطه‌های هادی انتخاب شده برای رسم نمودارها

جدول ۳ گام‌های تحلیل الگو

گام‌های تحلیل	شماره گام	گام آغاز تحلیل	گونه تحلیل	گونه بارگذاری	زمان (روز)
گام نخست	۰	۰	–	ساخت گام به گام	۰
گام ۱	۱	۰	پلاستیک	ساخت گام به گام	۲
گام ۲	۲	۱	مومسان	ساخت گام به گام	۲
گام ۳	۳	۲	مومسان	ساخت گام به گام	۲
گام ٤	٤	۳	مومسان	ساخت گام به گام	۲
گام ٥	٥	٤	مومسان	ساخت گام به گام	۲
گام ٦	٦	٥	مومسان	ساخت گام به گام	۰/۱
گام ۷	۷	٦	تحکیمی	ساخت گام به گام	١٤٦٠
گام ۸	۸	۷	مومسان	ساخت گام به گام	۱
گام ۹	۹	۸	تحکیمی	ساخت گام به گام	۱۸۲٥
گام ۱۰	۱۰	۹	تحکیمی	ساخت گام به گام	٥٤۰
گام ۱۱	۱۱	۱۰	تحکیمی	کمترین فشار آب منفذی	٥۹٦٦۰

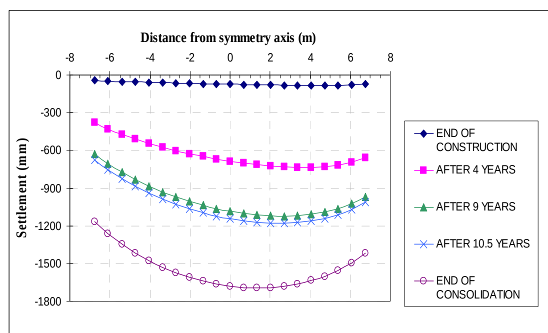
نتیجه‌های الگوسازی بدون مسلح‌کننده

فشــار آب حفــره‌ای. شــکل (٤) تغییــرات فشــار آب حفره‌ای در وسط خاک پیت نسبت به زمان را نشـان مـی دهد. با توجه به نمودار مشاهده مـی‌شـود کـه در پایـان ساخت، فشار آب حفـره‌ای در زیـر خـاکریز بـه حـدود $\text{٥٤/٤}kN/m^2$ می‌رسد که می‌توان علت این افزایش فشـار آب حفره‌ای را اجرای سریع خاکریز و نبودن زمان کـافی برای زهکشی دانست. شایان توجه اسـت کـه فشـار آب حفره‌ای به صورت تقریبی برابر با سربار وارد شده به پی در اثر ساخت خاکریز می‌باشد. پس از پایان یافتن ساخت خاکریز بار رفت و آمد برابر با ۱۲ kN/m^2 به خاکریز وارد آمده است که در اثر این بار نیز فشار آب حفره‌ای اضافی افزایش یافت. بیشترین فشـار آب حفـره‌ای در ایـن گـام برابر ٦۰/٥ kN/m^2 می‌باشد. در اثـر تحکـیم تـدریجی بـا بیرون رفتن آب از بستر فشار آب حفره‌ای اضافی کـاهش می‌یابد. به گونه‌ای که پس از ١٦٣ سـال همـه فشـار آب حفره‌ای اضافی از بین رفته و به ۱ kN/m^2 می‌رسد.



شکل ٤ تغییرات فشار آب حفره‌ای اضافی نسبت به زمان در بخش میانی لایه پیت

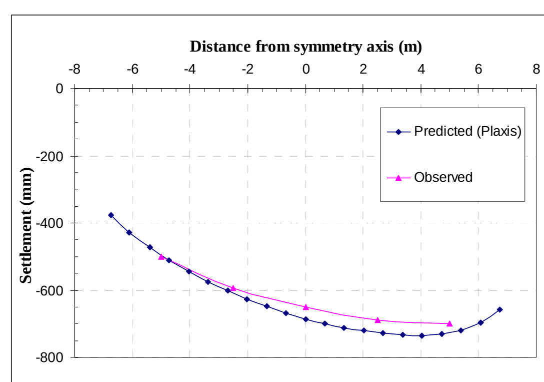
تغییر مکان‌های قائم (نشست). شکل (٥) نشسـت تـاج خاکریز در گام‌های تحلیل را نشان می‌دهد. بـا توجـه بـه ایـن نمـودار بیشـترین نشسـت آنـی خـاکریز برابـر ٨/٣ سانتی‌متر می‌باشد. این نشست بیشتر ناشی از تغییر شـکل مصالح خاکریز می‌باشد. زیرا در این گام با توجه به فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در پی و نبودن زمان کـافی بـرای زهکشی آن، تنش مؤثر افزایش چنـدانی نداشـته و تغییـر شکل‌های زیادی در پی پدید نیامده است. با گذشت زمان در اثر زهکشی پی و افزایش تنش مؤثر پـی تغییـر شـکل های تاج خاکریز نسبت به زمان پایـان سـاخت ناشـی از تغییر شکل پی می‌باشند. با توجه به شکل‌هـا و نمودارهـا می‌توان مشاهده کرد که پـس از گذشـت چهـار سـال از سـاخت خـاکریز بیشـترین نشسـت خـاکریز در نقطـه B (حاشیه راست جاده – شکل ۳) و برابر ٧٣/٦ سـانتی‌متـر می‌باشد. در حاشیه چپ خاکریز یعنی نقطه C (شـکل ۳) مقدار نشست برابر ٤۰ سانتی‌متـر اسـت. دلیـل‌هـای ایـن تفاوت‌ها عبارتنـد از: ۱- شـیب‌دار بـودن مقطـع عرضـی زمین ۲- تفاوت ارتفاع خاکریز در حاشیه راست و چـپ خاکریز و ۳- ضخیم بودن مقطع خاک پیت در پی در زیر خاکریز، در حاشیه راست جاده نسـبت بـه حاشـیه چـپ جاده (شکل ۱). پس از چهار سال بیشترین مقدار نشست پی در زیر خاکریز و محور وسط و برابـر ٦٥ سـانتی‌متـر می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بخـش بزرگتـر تغییـر شـکل‌هـا وابسـته بـه پـی و نشسـت تحکیمـی آن می‌باشـد. در ایـن دوره در پنجـه‌هـای خـاکریز بـه دلیـل فشـردگی مصـالح و بـرون‌زدگـی مصـالح حاشـیه تـورم مشاهده شده است.



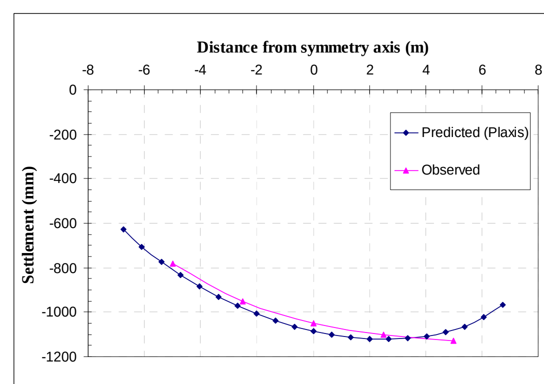
شکل ٥ نشست تاج خاکریز در گام‌های مختلف تحلیل

با توجه به نمودارهای نشست نسبت به زمـان، بـا گذشت زمان مقدار نشست خـاکریز افـزایش یافتـه و در سال نهم مقدار بیشینه به ۱۱۲ سانتی‌متر رسـیده و پـس از هجده ماه (سال ۱۰/٥) این مقدار ۱۱۸ سـانتی‌متـر شـده

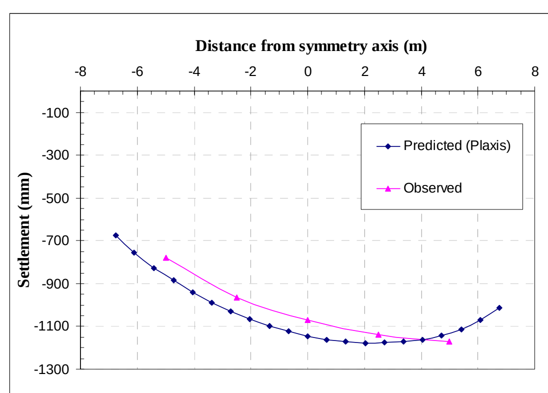
است. یعنی در طی این هجده ماه ٦ سانتی‌متر افزایش نشست، روی داده است. در شکل‌های (٦) تا (٨) مقدارهای مشاهده شده در صحرا با مقدارهای که برنامه PLAXIS در این سه مرحله پیش‌بینی کرده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به این شکل‌ها هماهنگی خوبی بین نتیجه‌های تحلیل و مقدارهای اندازه‌گیری شده وجود دارد. زمان از بین رفتن کامل فشار آب حفره‌ای در حدود ۱۶۳ سال برآورد می‌شود. در این مدت بنا به شکل (۵) بیشترین نشست برابر ۱۶۹ سانتی‌متر خواهد شد. بنابراین انتظار می‌رود به میزان ۵۱ سانتی‌متر نشست به نشست‌های قبلی افزوده شود.



شکل ٦ مقایسه نتیجه‌های پیش‌بینی شده با کمک برنامه PLAXIS و مقدارهای اندازه‌گیری شده نشست در سال چهارم پس از پایان ساخت

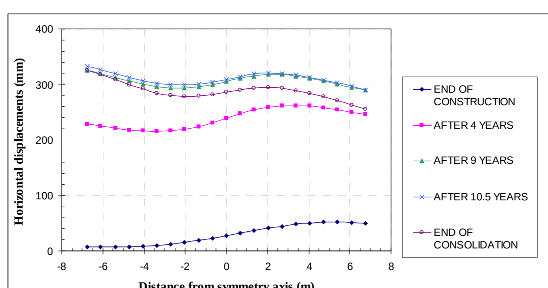


شکل ۷ مقایسه نتیجه‌های پیش‌بینی شده باکمک برنامه PLAXIS و مقدارهای اندازه‌گیری شده نشست در سال نهم پس از پایان ساخت



شکل ۸ مقایسه نتیجه‌های پیش‌بینی شده با کمک برنامه PLAXIS و مقدارهای اندازه‌گیری شده نشست پس از ده سال و شش ماه از پایان ساخت

تغییرمکان‌های افقی. تغییر مکان افقی تاج خاکریز در تحلیل در شکل (۹) نشان داده شده است. پس از پایان ساخت بیشترین تغییر مکان افقی در نقطه هادی D (شکل ۳)، برابر ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. با گذشت زمان تغییرمکان‌های افقی خاکریز افزایش یافته در سال چهارم بیشترین تغییر مکان در نقطه D و برابر ۴۵/۸ سانتی‌متر و در تاج خاکریز در نقطه‌های C، A،B (شکل ۳) به ترتیب برابر ۲۳، ۲۵ و ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. در سال نهم بیشترین تغییر شکل افقی در نقطه D برابر ۵۷/۱ سانتی‌متر و در نقطه‌های C، B ،A نزدیک به ۳۱ سانتی‌متر می‌باشد. در پایان گام تحکیم بیشترین تغییرمکان افقی در نقطه D روی داده و برابر ٦۱/۷ سانتی‌متر می‌باشد.

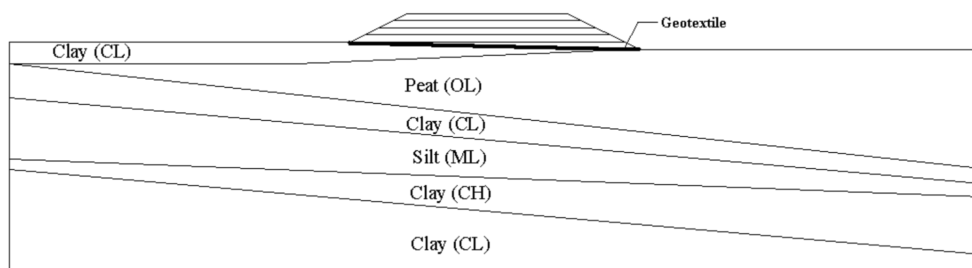


شکل ۹ تغییرمکان افقی تاج خاکریز در گام‌های گوناگون تحلیل

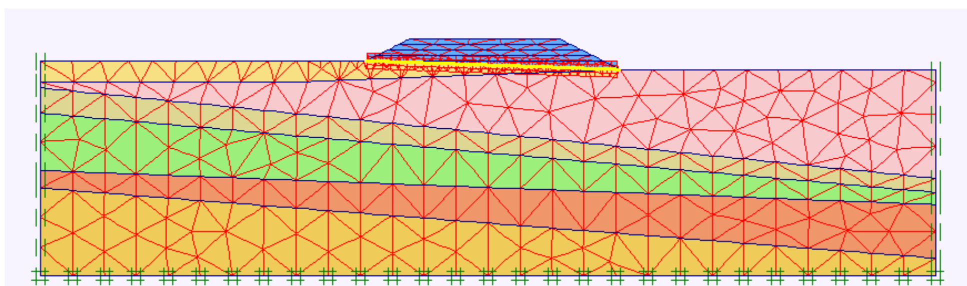
الگوسازی با کاربرد مسلح کننده در خاکریز

در این مرحله از الگوسازی بنا به شکل (١٠)، با کمک یک لایه ژئوتکستایل که در عرض و طول خاکریز یکپارچه پهن می‌شود، بستر خاکریز مسلح شده است. لایه ژئوتکستایل بین خاکریز وبستر به کار رفته و ویژگی‌های آن معرفی می‌شود. PLAXIS ژئوتکستایل را یک جزء کششی که گونه آن با عامل EA در نرم‌افزار معرفی می‌شود، در نظر می‌گیرد [٩]. در این الگوسازی مقدار EA= ٢٥٠٠ kN/m منظور شده است. با به کار بردن Interface، اندرکنش ژئوتکستایل با خاک در محل تماس آن با خاکریز و پی الگوسازی می‌شود. در نرم‌افزار PLAXIS عامل R تعیین‌کننده مقاومت برشی خاک و مسلح‌کننده می‌باشد. بنا به پژوهش‌هایی که Bergado و همکارانش با شبیه‌سازی آزمایش‌های برش مستقیم و Pullout Test با نرم‌افزار PLAXIS انجام داده‌اند R=٠/٩ در نظر گرفته شده است [18]. شکل (١١) چگونگی شبکه‌بندی الگو با وجود مسلح‌کننده ژئوتکستایل در زیر خاکریز را نشان می‌دهد.

در تحلیل الگوی عددی نخست اجرای لایه ژئوتکستایل به مدت یک روز شبیه‌سازی شده و پس از آن، خاکریز گام به گام و در لایه‌هایی به ضخامت ٠/٦ متر و با فرض مدت زمان دو روز برای ساخت هر لایه ساخته شده است. سپس تحلیل تحکیم برای سال‌های گوناگون (٤، ٩ و ١٠/٥ سال پس از پایان ساخت و پایان تحکیم) به انجام رسیده است. گام‌های تحلیل و چگونگی محاسبات در جدول (٤) آمده‌اند.



شکل ١٠ نمایی از هندسه الگوی خاکریز مسلح و لایه‌های پی با وجود ژئوتکستایل



شکل ١١ چگونگی شبکه‌بندی الگو با وجود مسلح‌کننده ژئوتکستایل در زیر خاکریز

جدول ٤ گام‌های تحلیل الگو

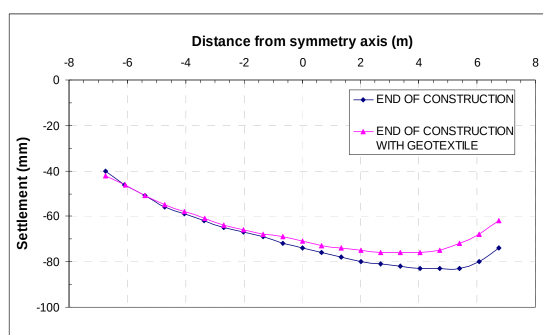
گام‌های تحلیل	شماره گام	گام آغاز تحلیل	چگونگی تحلیل	بارگذاری	زمان (روز)
گام نخست	۰	۰	–	ساخت گام به گام	۰
گام ۱	۱	۰	مومسان	ساخت گام به گام	۱
گام ۲	۲	۱	مومسان	ساخت گام به گام	۲
گام ۳	۳	۲	مومسان	ساخت گام به گام	۲
گام ٤	٤	۳	مومسان	ساخت گام به گام	۲
گام ٥	٥	٤	مومسان	ساخت گام به گام	۲
گام ٦	٦	٥	مومسان	ساخت گام به گام	۲
گام ۷	۷	٦	مومسان	ساخت گام به گام	۰/۱
گام ۸	۸	۷	تحکیمی	ساخت گام به گام	۱٤٦۰
گام ۹	۹	۸	تحکیمی	ساخت گام به گام	۱۸۲٥
گام ۱۰	۱۰	۹	تحکیمی	ساخت گام به گام	٥٤۰
گام ۱۱	۱۱	۱۰	تحکیمی	کمترین فشار آب منفذی	٦۹۱۲۰

نتیجه‌های الگوسازی با کاربرد مسلح‌کننده در خاکریز

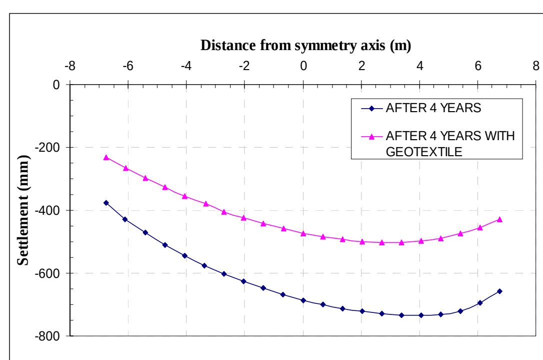
فشار آب حفره‌ای اضافه. بنا به نتیجه‌های تحلیل بیشترین فشار آب حفره‌ای اضافه، در پایان ساخت و پس از وارد شدن بار رفت و آمد در زیر خاکریز روی داده و در دو حالت مسلح و غیر مسلح به صورت تقریبی برابر می‌باشند. با گذشت زمان و زهکشی مصالح بستر فشار آب حفره‌ای اضافه، کاهش می‌یابد. در سال‌های نخست تحکیم بیشینه فشار آب حفره‌ای اضافه در خاکریز مسلح نسبت به خاکریز غیر مسلح بیشتر است که بیانگر کمتر بودن میزان زهکشی و نشست تحکیمی در خاکریز مسلح می‌باشد. زمان از بین رفتن فشار آب حفره‌ای اضافه در خاکریز مسلح، ٢٦ سال بیشتر از خاکریز غیر مسلح است، به سخن دیگر نشست در خاکریز مسلح کندتر روی می‌دهد.

نشست خاکریز (تغییرمکان قائم). نشست تاج خاکریز در گام‌های تحلیل و در دو حالت مسلح و غیر مسلح در شکل‌های (۱۲) الی (١٦) مقایسه شده است. نتیجه‌های حاصل از تحلیل نشان می‌دهد در پایان کارهای ساختمانی به دلیل ناشی شدن بخش بزرگتر نشست از تغییر شکل بدنه خاکریز، وجود ژئوتکستایل اثر چندانی در نشست خاکریز نداشته و تنها در شانه راست جاده میزان نشست را حدود ۹٪ کاهش داده است. در گام‌های بعدی با تحکیم پی، ژئوتکستایل اثر بیشتری در کاهش نشست می‌گذارد. همان‌گونه که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، در سال چهارم پس از ساخت خاکریز میزان کاهش نشست در تاج خاکریز حدود ٢٦٪ و در پی حدود ۳٥٪ بوده است. همچنین می‌توان ملاحظه کرد که در خاکریز غیرمسلح تفاوت نشست شانه راست و چپ جاده ۳۳/٦ سانتی متر می‌باشد، در حالی‌که در خاکریز مسلح این میزان به ۱۹/۷ کاهش یافته است؛ این چنین دریافت می‌شود که کاربرد لایه ژئوتکستایل نشست خاکریز را یکنواخت و پایداری خاکریز را افزایش می‌دهد. در سال چهارم در خاکریز غیر مسلح به دلیل بازسازی جاده مقداری بار اضافه شده ولی در خاکریز

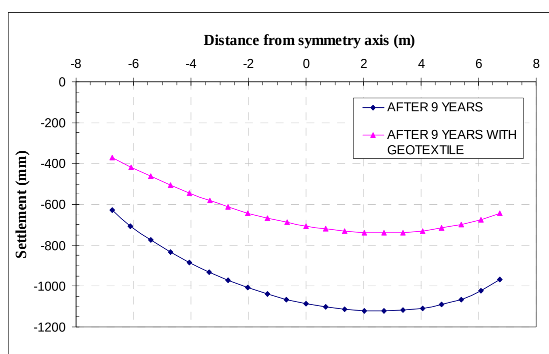
مسلح این بار وارد نشده است. از این رو، مقداری از نشست در خاکریز غیرمسلح وابسته به سربار ناشی از بازسازی جاده می‌باشد که باید درنظر گرفته شود. در حقیقت، مقداری از تفاوت نشست در دو حالت، وابسته به این سربار است. با در نظر گرفتن این مطلب در سال نهم کاهش نشست در تاج خاکریز برابر ۲۹٪ می‌باشد. پس از پایان تحکیم میزان تفاوت نشست به ۱۰٪ می‌رسد. این پدیده نشان می‌دهد که ژئوتکستایل از مقدار نشست تحکیم کل نمی‌کاهد بلکه سبب کاهش نرخ افزایش نشست در سال‌های اولیه می‌شود و پایداری را می‌افزاید. به سخن دیگر، با گذشت زمان و مقاومتی که از پی به دست می‌آید، کارایی ژئوتکستایل کاهش می‌یابد.



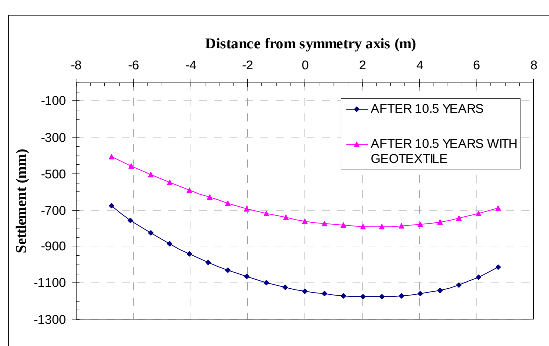
شکل ۱۲ مقایسه نشست تاج خاکریز در دو حالت مسلح و غیر مسلح در پایان ساخت



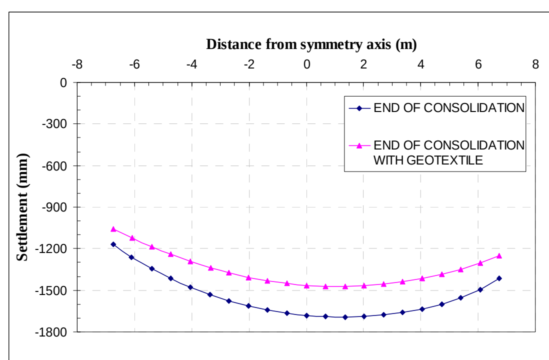
شکل ۱۳ مقایسه نشست تاج خاکریز در دو حالت مسلح و غیر مسلح پس از ٤ سال



شکل ١٤ مقایسه نشست تاج خاکریز در دو حالت مسلح و غیر مسلح پس از ۹ سال



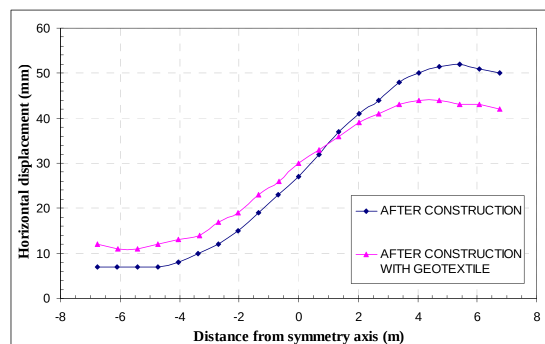
شکل ١٥ مقایسه نشست تاج خاکریز در دو حالت مسلح و غیر مسلح پس از ۱۰/۵ سال



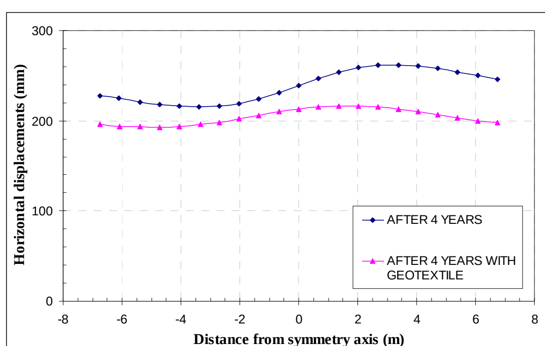
شکل ١٦ مقایسه نشست تاج خاکریز در دو حالت مسلح و غیر مسلح در پایان تحکیم

تغییر مکان‌های افقی. تغییر مکان‌های افقی تاج خاکریز در گام‌های تحلیل و در دو حالت مسلح و غیر مسلح در

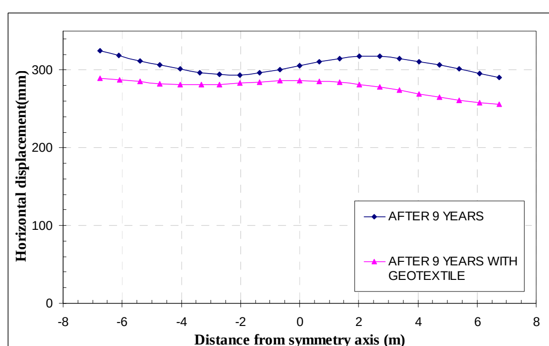
شکل‌های (۱۷) تا (۲۱) مقایسه شده‌اند. تغییر مکان‌های افقی واقعی را اداره کل راه و ترابری ارومیه در هنگام بهره‌برداری اندازه‌گیری نکرده است. با توجه به شکل‌ها، در پایان ساخت خاکریز کاهش تغییر شکل افقی بیشینه، برابر ۱۳٪ می‌باشد. پس از ٤ سال مقدار کاهش نشست برابر ۲۲٪ شده که در مقایسه با تغییر شکل‌های عمودی مقدار کاهش، کمتر است. در سال نهم میزان این کاهش به ۲٦٪ رسیده و در پایان تحکیم ۲٤٪ کاهش وجود داشته است. به نظر می‌رسد که مقدار کاهش تغییر مکان‌های افقی با کاربرد ژئوتکستایل کمتر از مقدار کاهش نشست است. دلیل اصلی این تفاوت شیبدار بودن بستر و گرایش خاکریز به تغییر شکل جانبی در این شیب می‌باشد.



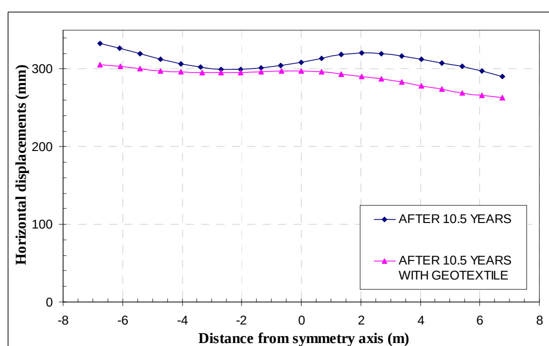
شکل ۱۷ مقایسه تغییرمکان‌های افقی تاج خاکریز در دو حالت مسلح و غیر مسلح در پایان ساخت



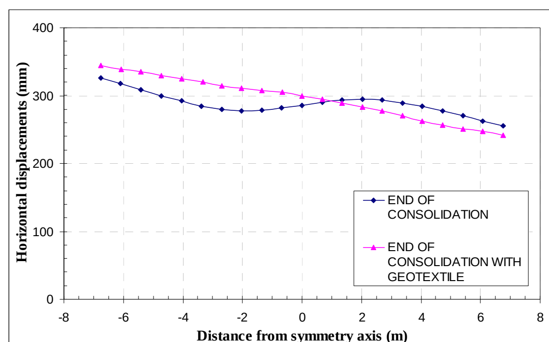
شکل ۱۸ مقایسه تغییرمکان‌های افقی تاج خاکریز در دو حالت مسلح و غیر مسلح پس از ٤ سال



شکل ۱۹ مقایسه تغییرمکان‌های افقی تاج خاکریز در دو حالت مسلح و غیر مسلح پس از ۹ سال



شکل ۲۰ مقایسه تغییرمکان‌های افقی تاج خاکریز در دو حالت مسلح و غیر مسلح پس از ۱۰/۵ سال



شکل ۲۱ مقایسه تغییرمکان‌های افقی تاج خاکریز در دو حالت مسلح و غیر مسلح در پایان تحکیم

تغییر شکل‌های ژئوتکستایل. پس از ساخت خاکریز و پیش از تحکیم خاک پی از کناره‌ها (به علت فشردگی‌پذیری وبافت پوک خاک پیش از زهکشی) بالا

آمد و کناره‌های ژئوتکستایل به سوی بالا تغییر شکل داد. ولی پس از تحکیم به علت زهکشی و تحکیم پی بخش برآمده کناره نیز نشست کرد و ژئوتکستایل در همه طول خود دارای جابه جایی به سوی پایین می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که پس از پایان ساخت در پنجه‌های خاکریز ژئوتکستایل گرایش به جابه جایی به بیرون خاکریز دارد. پس از پایان تحکیم ژئوتکستایل همراه با جابه جایی خاکریز به سوی راست جابه جا می‌شود، ولی نسبت به خاکریز، جابه جایی چندانی ندارد، یعنی لغزش خاکریز روی ژئوتکستایل روی نمی‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار خاکریز ساخته شده روی لایه‌های خاک آلی و سست در بخشی از بزرگراه شهید کلانتری از نظر تغییر مکان‌های قائم (نشست) و افقی و همچنین فشار آب حفره‌ای بررسی شد. نشست‌های قائمی که در طول ۹ سال پس از احداث بزرگراه روی دادند، به خوبی با نتیجه‌های تحلیل عددی هماهنگی داشتند. در ادامه در پی یافتن چاره‌ای برای کاهش نشست، اثر وجود یک لایه مسلح‌کننده ژئوتکستایل در بستر جاده مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های تحلیل‌های نشست نشان داد که کاربرد لایه ژئوتکستایل به عنوان مسلح‌کننده کارکرد خاکریز را در این بخش از جاده بهبود می‌بخشد. نتیجه‌های حاصل از این پژوهش را می‌توان به این صورت دسته‌بندی کرد:

١- نتیجه‌های به دست آمده از تحلیل نشست خاکریز جاده شهید کلانتری در حالت غیر مسلح با مقدارهای نشست مشاهده شده هماهنگی خوبی دارد.
٢- به دلیل ضخامت بیشتر لایه پیت در سمت راست جاده و ارتفاع بیشتر خاکریز که از شیبدار بودن سطح زمین طبیعی ناشی شده، بیشترین میزان نشست در سمت راست خاکریز روی داده است.
٣- کارکرد نرم افزار PLAXIS در تحلیل و پیش‌بینی نشست خاکریز جاده موفقیت‌آمیز است.
٤- کاربرد الگوی Soft Soil Creep برای الگوسازی رفتار وابسته به زمان خاک‌های سست بسیار سودمند می‌باشد.
٥- به کاربردن مسلح‌کننده از تغییر مکان‌های عمودی و افقی خاکریز می‌کاهد.
٦- به علت شیبدار بودن بستر خاکریز، کاهش تغییر مکان‌های عمودی (نشست) بیش از کاهش تغییر مکان‌های افقی می‌باشد.
٧- لایه مسلح کننده ژئوتکستایل از نشست‌های تفاضلی می‌کاهد و پایداری خاکریز و زمان تحکیم پی را افزایش می‌دهد.

مراجع

1. Van Baars, S., "Soft soil creep modeling of large settlements", *Proceedings of 2nd International Conference on Advances in Soft Soil Engineering and Technology.* 2-4 July, Putrajaya, Malaysia. (2003).
2. Rowe, R.K. and Li, A.L., "Geosynthetic reinforced embankments over soft foundations", Geosynthetics International, Special Issue on The Giroud Lecture, 12 (1), pp. 50-85, (2005).
3. Borges, J.L. and Cardoso, A.S. "Overall stability of geosynthetic reinforced embankments on soft soils", *Geotextiles and Geomembranes*, 20, pp. 395-421, (2002).
4. Bergado, D.T., Long, P.V. and Murthy, B.R.S., "A case study of geotextile-reinforced embankment on soft ground", *Geotextiles and Geomembranes*, 20, pp. 343-365, (2002).

5. Hincherberg, S.D. and Rowe, R.K., "Geosynthetic reinforced embankments on soft clay foundations: Predicting strains at failure", *Geotextiles and Geomembranes*, 21, pp. 151-175, (2003).
6. Volk, J.C., Hunt, R.E., Leshchinsky, D., Diloreto, R. and Collins, T.G. "Reinforced embankment over very soft soils: Grassy ground highway embankment", *Proceedings of 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products,* Singapor, 1, pp. 41-48, (1994).
7. Shimel, S., and Gertje, H. "The use of geotextile for roadway embankment over soft soils", Proceedings Geosynthetics, 97, pp. 25-38, (1997).
8. Clough, R.W., and Woodward, R.J., "Analysis of embankment stresses and deformations", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division,* ASCE, 93 (4), pp. 529-549, (1967).
9. PLAXIS, Version 8.2 Reference manual, Web: http://www.PLAXIS.nl.com
10. Hunter, G. and Fell, R., "Prediction of impending failure of embankment on soft ground", *Canadian Geotechnical Journal,* 40, pp. 209-220, (2003).
11. Hedy, R., Mols, H., Sawarendro, E., Teunissen, E. and Deutekon, J., "The Bereng Bengkel trial embankment", *Geotechnique*, 6 (4), pp. 32-42, (2002).
12. Haval, F., "Creep in soft soil", Doctoral thesis for the degree of doktor ingenior, Norwegian University of Science and Technology, (2004).
13. Ravask, D., "Modeling creep of soft Finnish clay", Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki University of Technology, (2006).
14. Kutara, K., Miki, H., Mashita, Y. and Seki, K., "Settlement and countermeasures of the road with low embankment on soft ground", *Tech. Reo. of Civil Eng., JSCE*, 22(8), pp. 13-16 (In Japanese), (1980).
15. Chai, J.C. and Miura, N., "Traffic load-induced permanent deformation of road on soft subsoil", *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Journal,* (ASCE) . (2002).

۱٦. "آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران"، شماره ۲۳٤، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، دفتر امور فنی و تدوین معیارها، (۱۳۸۳).

17. Segal, G., and Haag, D., "*SEPRA ANALYSIS – Introduction*", Ingenieursbureau SEPRA, The Netherlands, (2009).
18. Bergado, D.T., Youwai, S., Teerawattanasuk, C. and Visudmedanukul, P., "The interaction mechanism and behavior of hexagonal wire mesh reinforced embankment with silty sand backfill on soft clay", *Computers and Geotechnics*, 30, pp. 517-534, (2003).